

S F U による宇宙環境の研究

佐々木進、小山孝一郎、渡辺勇三（宇宙科学研究所） 賀谷信幸（神戸大学）
 横田俊昭（愛媛大学） 宮武貞夫（電気通信大学） 佐川永一（通信総合研究所）
 太田正廣（東京都立大学） 遠山文雄（東海大学） 松岡忍（USEF）

1 はじめに

SFU(Space Flyer Unit; 宇宙実験・観測フリーフライヤ)は、宇宙科学研究所(文部省)、無人宇宙実験システム研究開発機構(通産省)、宇宙開発事業団(科学技術庁)が共同で開発した、無人の再使用型多目的宇宙実験プラットフォームである¹⁾。SFUは、H-II-3号機により1995年3月18日に打ち上げられ、現在高度約486kmのミッション軌道を、順調に飛行している。これまで、赤外線望遠鏡による宇宙観測、いもりを用いた宇宙生物実験、電気炉による産業実験、JEN曝露部部分モデル実験、各種の理工学実験が順次行われ、所期の成果を上げている。実験終了後は、本年12月にスペースシャトル72号機により回収されることになっている。

SFUには、ガス、プラズマ、電磁波動、磁場、マイクロG、光学環境を計測するための宇宙環境計測装置が搭載されており、SFU機上及び周辺に形成される宇宙環境の研究に用いるとともに、搭載実験機器の共通的な計測装置の役割を果たしている。本論文では、SFU環境計測装置を用いた宇宙環境の研究内容とこれまで得られたデータについて報告する。

2. 宇宙機周辺に形成される宇宙環境

宇宙空間を高速で飛行する宇宙機の周辺には、宇宙機と宇宙媒質(ガスやプラズマ)との相互作用や、宇宙機自身からのガスや電磁作用により、自然の宇宙環境とは大きく異なった粒子環境や電磁環境が形成される²⁾。これらの環境形成のプロセスの研究は、プラズマ物理や天体物理と密接な関連を持っている。また、宇宙機上や宇宙機周辺に形成される宇宙環境(SIE; Spacecraft-induced Environment)は、搭載機器や宇宙飛行士が現実に体験する宇宙環境であり、宇宙機周辺にどのような環境が形成されるかを明らかにすることは、宇宙環境利用の立場からも重要である。

図1に示すように、宇宙機周辺には様々なガス、プラズマ、電磁現象が励起される。宇宙機の進行方向側では、宇宙機表面との反射で作られるイオンビームや無衝突衝撃波が発生する。一方、宇宙機の後方ではガスやプラズマが排除された領域(ボイド)が形成され、プラズマの密度勾配による不安定性や波動励起、粒子加熱が発生する。宇宙機

の電位は、周辺のプラズマからの電流だけでなく、太陽紫外線による宇宙機表面からの二次電子電流の釣り合いにより決まる。気密室からのガスリークや軌道維持・姿勢制御のためのスラスト運用によるガス放出は、周辺プラズマとの相互作用によりガス放電現象などの電磁現象を励起する。また、太陽発電衛星などの高電圧部を持つ宇宙機は、荷電粒子の加速や電流系の形成により周辺のプラズマや電磁環境に強い擾乱を与える³⁾。

これら宇宙機周辺の環境は、通常多くの要因が相互に作用しあうため非常に複雑である。一つの物理量を1点のみいくら精密に計っても環境の全貌をつかむことはできない。従って、関連する基本的な物理量をできるだけ多く総合的に計測すると同時に、同じ物理量でもできるだけ多くの点で計測する必要がある。SFU環境計測装置は、これら総合計測、多点計測を考慮した上で開発されたものである。

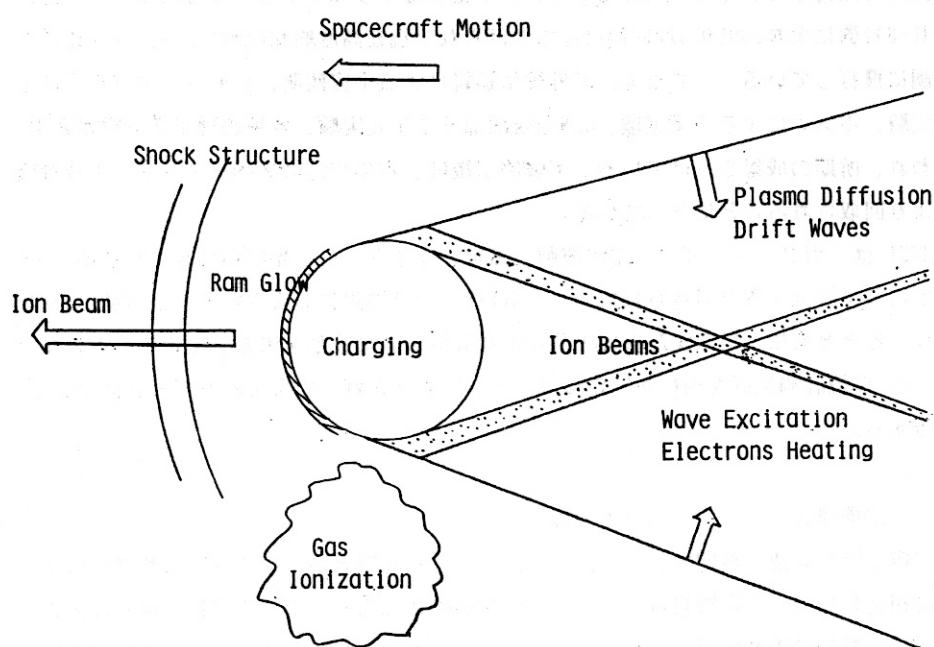


図1 飛翔体周辺で励起される物理現象

3 SFU環境計測装置

SFUには、バス系及びミッション系の2種類の環境計測装置が搭載されている⁴⁾。バス系の計測装置は、曝露部に搭載する計測器パッケージ (SEM; Space Environment Monitor) 1台と、実験機器が収納されているペイロードユニットボックス内に搭載される小型計測器パッケージ (PEM; Payload unit box Environment Monitor) 4台で構

成される。ミッション系の計測装置 (SPDP; Space Plasma Diagnostic Package) も曝露部に搭載されている。図2にSEMとSPDPの外観図、図3に両計測器パッケージの搭載位置を示す。

これらの環境計測装置により、粒子、電磁場、波動、光学、加速度などの主要な宇宙環境パラメータの総合計測が行われている。また、マイクロG計測についてはSEM及びPEM内の5ヶのセンサーで、ラングミュア特性とフローティング電位及び電磁波動についてはSEM上1ヶとSFU表面上3ヶの合計4ヶのセンサーで、真空度計測についてはSEM内の2ヶの真空ゲージにより、複数点での計測を行っている。表1に各計測器の性能を示した。

本研究では、SFUが静かに飛翔している時の宇宙環境を計測するだけでなく、SFUを回転させてラム・ウェイク的环境を連続的に計測したり、ヒドラジンのスラスタを動作させてSFUの周辺環境に擾乱を与えたりする実験も行っている。また、SFUの周辺環境に大きな擾乱を与える電気推進実験 (MPDアークジェット) や二次元展開実験 (大型構造物展開実験) のグループとも共同で運用を行い計測データを取得している。

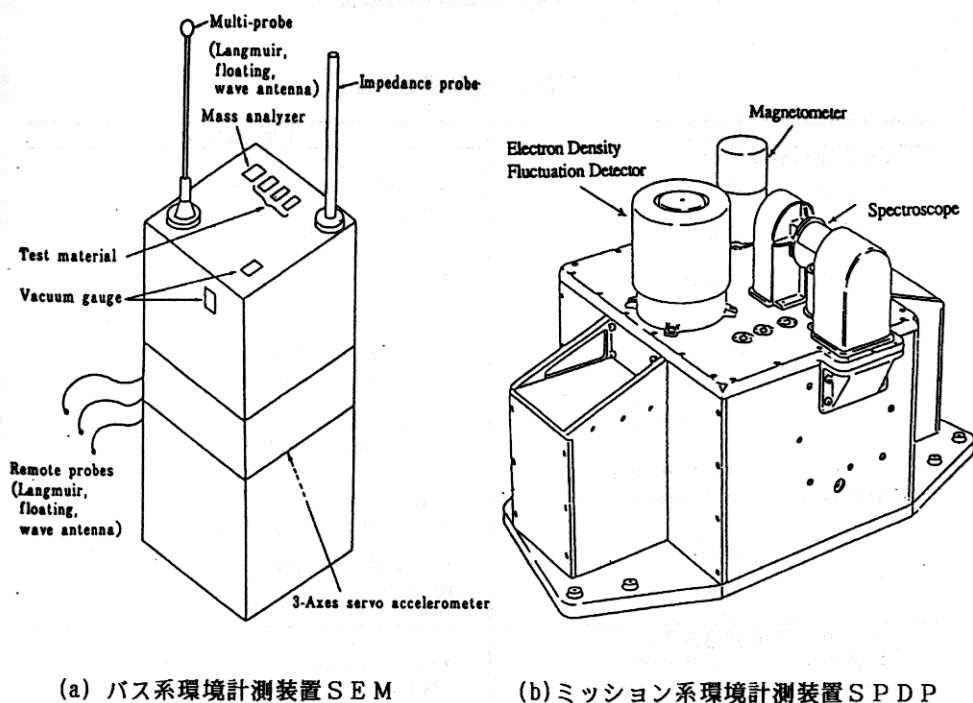


図2 SFU環境計測装置

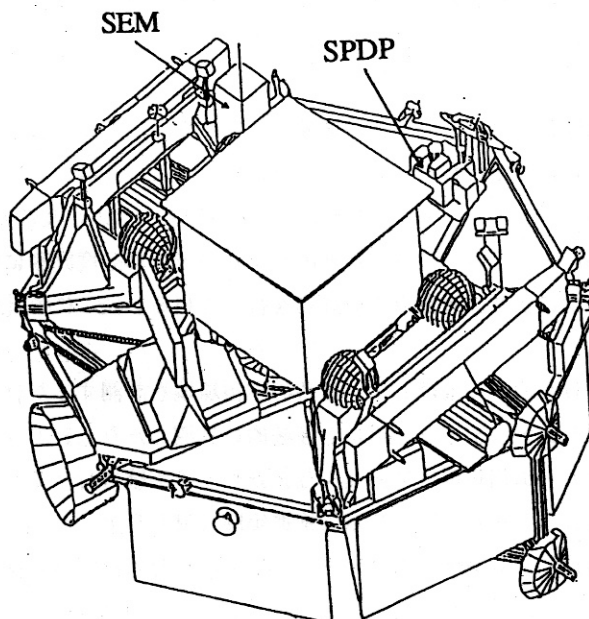


図3 SFU環境計測装置の搭載位置

表1 SFU環境計測装置の性能

計測器		主要性能
バス系環境計測装置		
暴露部	真空計	電離真空計 2 センサー $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-8}$ Torr
	質量分析器	4 重極型センサーCEM付 2 ~ 100 AMU
	プラズマプローブ	4 センサー ラングミュアモード (± 2 V 掃引) フローティングプローブ (± 100 V)
	インピーダンスプローブ	0 ~ 10 MHz, 0 ~ 300 pF
	波動受信機	4 センサー, 2 受信機 0.1 kHz ~ 10 MHz
	マイクロGメーター	3 軸サーボ型 ± 12.4 mg, 分解能 10μ g
PLU部	材料劣化試料	8 種類
	マイクロGメーター	3 軸サーボ型 $\pm 880 \mu$ g, 分解能 10μ g
	真空計	ピラニ型 10 mTorr ~ 1 Torr
	温度計	IC 温度センサー -30 ~ +70 °C
ミッション環境計測装置		
暴露部	可視分光器	2,000 ~ 8,000 Å, 分解能 25 Å 回転ミラー, 試料照射用レーザー付
	磁力計	3 軸フラックスゲート型 ± 0.5 Gauss, 分解能 0.1 %
	電子密度変動検出器	1 Hz ~ 30 kHz, CEM 検出方式
	材料劣化試料	3 種類

4 SFUで得られた宇宙環境データ

SFU環境計測装置は、打ち上げ約1週間後に初期機能チェックを行い正常であることを確認した。その後、原則として30分を単位に、現在までほぼ150時間以上運用され大量のデータを取得している。SFUは図3の機器搭載面を太陽に向けて飛翔する太陽指向姿勢をとるため、計測器は1周回(約90分)でラム側とウェイク側を交互に向くことになる。ただしラム・ウェイクの環境を短い時間で連続的に計測するため、SFUを速度ベクトルと直角の軸に対し、毎秒0.2度の速度で回転させる実験も行っている。本格的なデータ処理は、今後行われる予定であるが、以下に代表的なデータを示す。

(1) ガス環境

図4に打ち上げ後からの、2台の電離真空計(最高感度 2×10^{-8} Torr)で計測した真空度の変化の様子を示す。計測器上面(太陽指向側)では、日照時はセンサー内部で発生する二次電子の影響を受けて、見かけ上ガス密度が高く計測されている。側面センサーは、上面センサーよりもSFU本体からのアウトガスの影響を受けやすいため、相対的にガス密度が高くなっている。打ち上げ後4ヶ月たった現在でも、計測されているガス密度は、標準的な地球環境モデルのガス密度より数倍から10倍程度高く、宇宙機本体からのアウトガスが支配的であることを意味している。

図5に質量分析器のデータを示す。質量分析器の開口は、上面の電離真空計と同様、太陽指向面にある。水、酸素、窒素の成分が検出されており、これらのデータもまた宇宙機の表面周辺では、宇宙機本体からのガスが支配的であることを意味している。

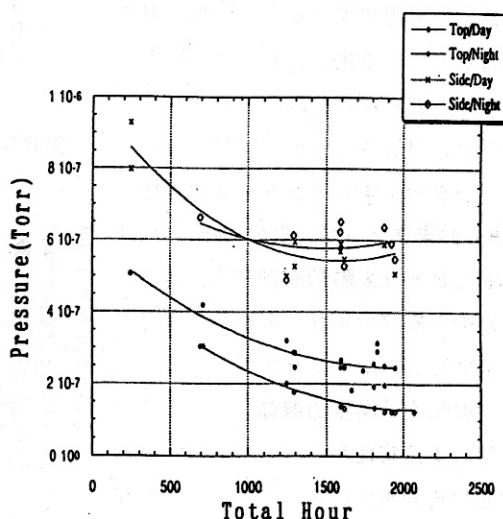


図4 真空度の履歴

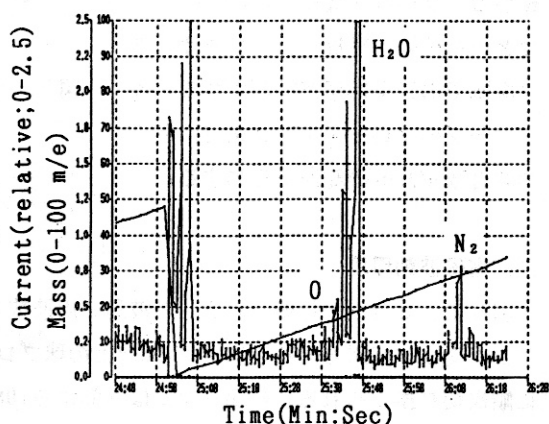


図5 質量分析器のデータ

(2) プラズマ環境、飛翔体電位

インピーダンスプローブは、プローブ（直径27mm、長さ220mm）にプラズマ周波数付近の高周波を掃引して印加し、レゾナンス周波数を検出してプラズマ密度を正確に求める計測器である。図6にインピーダンスプローブのデータを示す。容量のピークがプラズマのUHR周波数に対応し、これからプラズマ密度を導出できるが、時間帯や姿勢により大きく変化し、ピークが検出できないこともある。図7はラングミュアプローブとフローティングプローブのデータを示す。センサーは16秒毎にSEM上の球プローブ（直径40mm）とSFU表面上3ヶ（太陽指向側2ヶ、裏側1ヶ）の平板プローブに順次切り換えられている。ラングミュア特性からプラズマの密度と温度の概算、固定バイアス時の電流特性からプラズマ密度の相対的な変動を求める。フローティングプローブモードでは、プローブ電極はSFU本体と100M Ω の高抵抗で接続され、球プローブの場合はSFU本体とプラズマとの電位差、平板プローブでは、その場所での帯電電圧が計測される。各プローブのフローティング電位は多くの場合数ボルトの範囲で変動する。

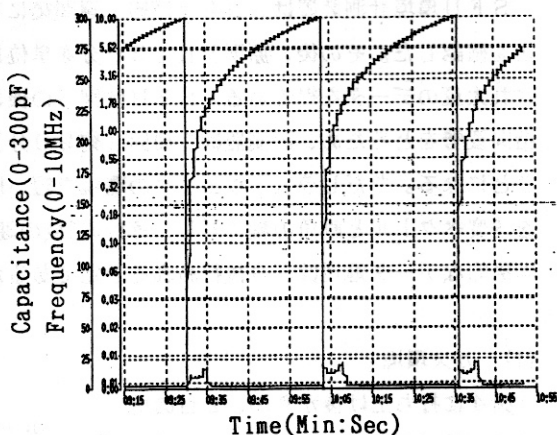


図6 インピーダンスプローブのデータ

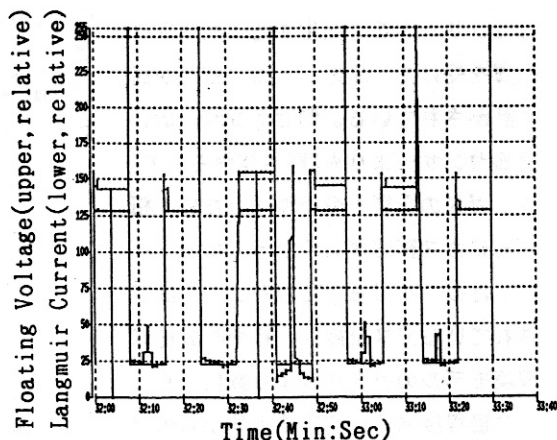


図7 ラングミュア及びフローティング
プローブのデータ

(3) 電磁波動環境

図8に、2台の受信機で計測した波動の周波数スペクトルを示す。2台の受信機とも、ラングミュア回路と同様、16秒毎にSEM上の球プローブとSFU表面上3ヶの平板プローブに順次切り換えられる。計測レンジは3kHzから10MHz、掃引時間は16秒である。バンド幅は、300kHzまでが3kHz、10MHzまでが30kHzである。多くの場合、比較的低い周波数帯

に広帯域の信号が検出されているのが特徴で、スペースシャトルオービターで観測されているブロードバンド静電ノイズ(BOGES; Broad-band Orbiter Generated Electro-Static noise)に類似したものと考えられる。

(4) 磁場計測

図9に、30分間の磁場計測の例を示す。SFUは太陽指向姿勢で約90分の周年運動しているため、地球約1/3周分の地球磁場の相対的時間変化が表示されている。今後、絶対値較正を行った上で、地球磁場の標準モデルと比較することになっている。標準磁場からの逸脱分が、SFUに起因する磁場であり、SFU本体の残留磁場や磁気トルカ、本体の各部を流れる電流系が磁場環境に影響を与えていると考えられる。

(5) 分光観測

可視分光器は、シャトルグローと呼ばれる飛翔体進行方向側での発光現象、MPDアークジェットプラズマからの発光現象、高電圧太陽電池動作に伴うSFU周辺の発光現象、スラスター動作に伴うガズブルームの発光現象を観測する目的を持っている。また、図10に示すように、半透明膜の材料劣化研究試料(ポリイミド、アルミ蒸着ポリイミド、金蒸着ポリイミド)の下にセットした半導体レーザーからの光の強度を計測することにより、試料への原子状酸素作用や汚染の検出を行うことも

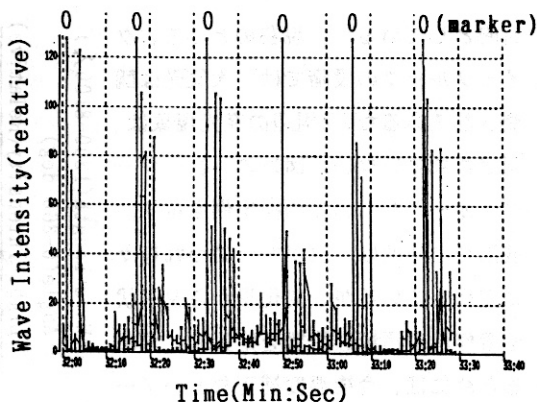


図8 波動受信機のパデータ

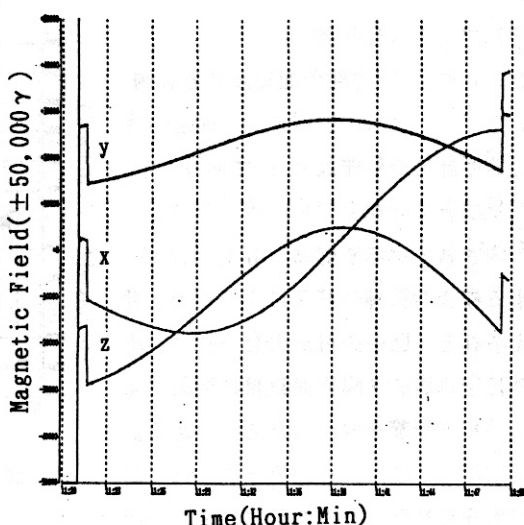


図9 磁力計のパデータ

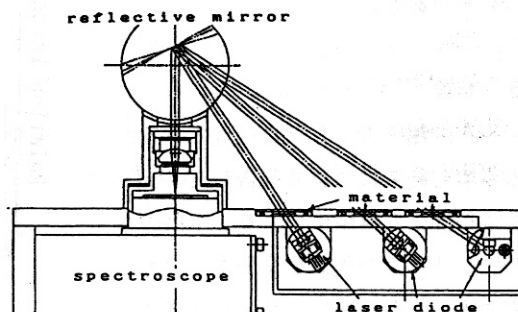


図10 半透明試料の透過光計測法

目的としている⁸⁾。現在のところ、クイックルックの段階では、大気光は観測されているがSFU周辺の発光現象は同定されていない。図11に、レーザーダイオードからの光の検出例を示す。検出光の強度は、日がたつにつれ様々に変化しているが、変化量から原子状酸素作用や汚染の影響を定量的に求めるためには、今後温度補正などのデータ処理が必要である。

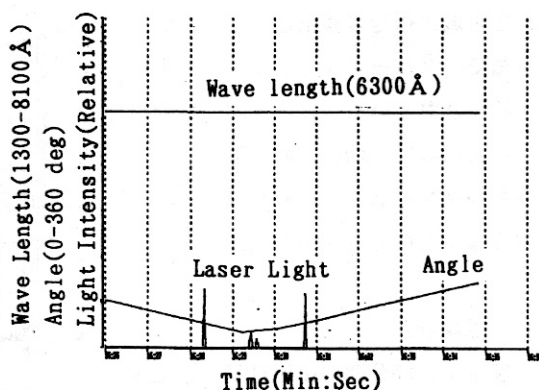


図11 半透明材料を通過した光の計測

(6) マイクロG計測

図12に、SEM内部の加速度計で計測したマイクロGのデータの1例を示す。加速度計の分解能は $10\mu\text{G}$ であり、空気抵抗分は計算上は $1\mu\text{G}$ 程度なので、計測されている変動は、SFU上に存在する様々な機械的擾乱によるものと考えられる。図中央付近のピークは、赤外線望遠鏡の太陽光遮断幕の展開による機械的衝撃を検出したものである。図13にマイクロG計測データに対し周波数分析を行った例を示す。様々な周波数スペクトルが検出されているが、その原因の同定は今後の解析作業を待つ必要がある。

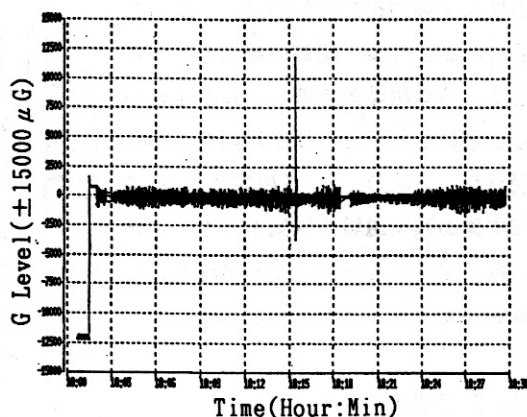


図12 マイクロGの計測例

5 結論

現在飛翔中のSFUで行っている宇宙環境の研究について報告した。データ取得はまだ継続中であり、本格的なデータ解析は今後の作業であるが、以下の4点が新しいテーマとして、今後重要な研究課題になると考えられる。

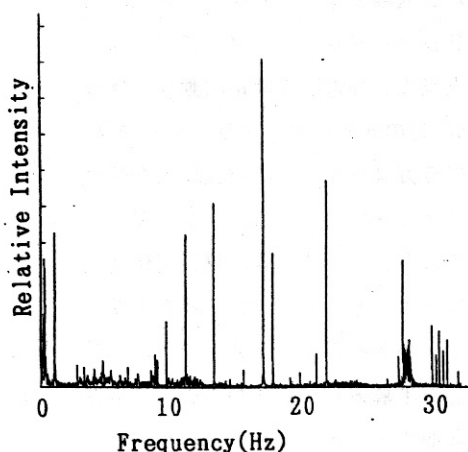


図13 マイクロG計測値の周波数分析結果

- (1) 大型飛翔体表面のガス密度とガス成分の長期的時間推移
- (2) SFUの4ヶ所ではほぼ同時に計測している電磁波動・プラズマ密度・フローティングポテンシャルによる飛翔体電磁環境の立体的な構造の解明
- (3) マイクロGの周波数解析による振動要因の解明
- (4) 材料劣化・汚染のその場解析と回収後の試料分析による飛翔体表面劣化、汚染のメカニズムの解明

宇宙機がその周辺に形成する宇宙環境は、宇宙機の形状や表面特性に依存し、それぞれの宇宙機特有の環境が形成される。これは、丁度太陽風中を運行する惑星が、その周辺に惑星毎に独特の電離層や磁気圏という環境を形成するのと同じ事情である。従って宇宙機が形成する宇宙環境のメカニズムを理解するためには、今後、できるだけ多くの機会を捉らえて大型宇宙機の宇宙環境計測を行い、データを蓄積し解析する必要がある。

宇宙機がその周辺に形成する宇宙環境の研究は、大きな目で見れば、人類の宇宙活動が宇宙環境へ与える影響の研究でもある。今後予想されている人類の大規模な宇宙活動は、ガス、微粒子、デブリ、プラズマ、電磁環境などの宇宙環境に大きな影響を及ぼす可能性がある。宇宙環境に大規模で強力な作用を与えるような大型の宇宙構造物の建設や、小型ではあるが大量に配備される小型衛星の時代を迎えるにあたって、宇宙環境を保全する立場から、これらの宇宙機が宇宙環境に与えるグローバルな影響の評価を行うことは今後ますます重要になると考えられている。

参考文献

- 1) 宇宙実験・観測フリーフライヤー (SFU) 栗木恭一、二宮敬虔、長友信人、若杉登、木村弘、伊地智幸一、石井豊彦、津屋直紀 三菱電機技報 Vol.65, 16-25, 1991年
- 2) SFUを用いた飛翔体環境の研究 佐々木進、渡辺勇三、小山孝一郎、河島信樹、賀谷信幸、横田俊昭、佐川永一、宮武貞夫、太田正廣、遠山文雄 宇宙科学研究所報告 第59号 1988年
- 3) High Voltage Solar Array Interacting with Ionospheric Plasma, H.Kuninaka, Y.Nozaki, and K.Kuriki, Space Power, Vol.8, 51-68, 1989.
- 4) Study of Spacecraft-generated Environment on Space Flyer Unit, S.Sasaki, Y.Watanabe, N.Kaya, T.Yokota, E.Sagawa, S.Miyatake, M.Ota, and F.Tohyama Proc. of the 19th ISTS, Yokohama, 769-774, 1994.
- 5) SFU環境観測用分光器 横田俊昭、佐々木進、河島信樹、渡辺勇三 宇宙科学研究所報告 第56号 1988年

原稿受付日

平成7年7月25日